



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.11>

УДК: 523.34-83

РАСЧЕТ СПЕКТРА ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ПОДПОВЕРХНОСТНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЛУННОГО ГРУНТА

О.В. Юшкова, В.Н. Марчук

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Московская обл., Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 1 января 2025 г.

Аннотация. Для исследования поверхности, подповерхностного слоя лунного грунта и поиска в нем внутренних пустот на орбитальный модуль «Луна 26» планируется установить комплекс радаров РЛК-Л. Для радиозондирования радары будут использовать линейно-модулируемые сигналы. Отраженные сигналы несут информацию о среде отражения. В данной работе рассмотрен механизм изменения спектра сигнала при отражении от слоистого грунта на основе модели многослойной диэлектрической среды имеющей поглощение.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, грунт, Луна, радар, сигнал, спектр, коэффициент отражения.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Марчук Василий Николаевич, marchuk_vn@mail.ru

Введение

В рамках проекта «Луна-Ресурс-1» для исследования поверхности и подповерхностного слоя грунта естественного спутника Земли планируется установка на орбитальный аппарат «Луна-26» радарного комплекса РЛК-Л, состоящего из двух радаров: Радара 20 (частотный диапазон 17.5 – 22.5 МГц) и Радара 200 (частотный диапазон 140 – 180 МГц) [1, 2]. Эти приборы будут излучать сигналы с постоянной амплитудой и линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), а затем, на те же антенные системы, принимать отраженные от грунта. Длительность излученного сигнала τ – 250 мкс, время приема отраженного – 350 мкс. Цель данной работы состоит в анализе изменения спектра радиосигналов радаров при их отражении от поверхности и подповерхностных границ слоев лунного грунта.

1. Свойства лунных пород и диэлектрическая модель грунта

Фото и видео -материалы, а также свидетельства участников возвратных лунных миссий подтверждают, что поверхность Луны практически везде покрыта слоем реголита, который лежит на более твердой основе из коренных пород, то есть имеет выраженную слоистую структуру. Для исследования в лабораторных условиях на Землю были доставлены образцы многих типов грунта из разных областей Луны. Результаты измерений показали, что действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' реголита имеет значения от 1.8 до 4, коренных пород – от 4 до 8 – 9 [3, 4]; тангенс угла потерь пород $tg(\delta_n) = \epsilon''_n/\epsilon'_n$ оценивается как $10^{-3} - 10^{-2}$. Этот факт позволяет надеяться на то, что на Луне, как и на Марсе, радиолокационным исследованиям радарными мегагерцового диапазона частот доступен слой грунта толщиной в несколько километров [5]. Для создания стационарных посадочных посадок наибольший интерес представляют районы, в которых ранее были обнаружены естественные внутренние пустоты (полости) [6].

Анализ закономерностей искажения спектра сигнала радаров при отражении от внутренних границ между средами с различающимися диэлектрическими свойствами будет проведен методами численного моделирования с использованием известных теоретических закономерностей радиофизики. Для симуляции работы радара выбрана модель лунного грунта, состоящего из трех слоев: реголита с диэлектрической проницаемостью ε_1 , далее лежит переходный слой, его диэлектрическая проницаемость ε_2 (если моделируется полость, то $\varepsilon_2 = 1$). Оба слоя расположены на фундаменте из коренных пород с ε_3 . Значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – комплексные. Таким образом, модель грунта характеризуется несколькими варьируемыми параметрами: толщиной верхнего слоя d_1 и переходного слоя d_2 , а также диэлектрическими проницаемостями этих слоев ε_1 и ε_2 , которые являются комплексными величинами $\varepsilon_n = \varepsilon'_n(1 + itg\delta_n)$, здесь n – номер слоя. С этими параметрами связаны величины t_n – времена распространения радиоволны внутри каждого слоя, состоящего из породы с диэлектрической проницаемостью ε'_n до его нижней границы и обратно формулой $t_n = \frac{2d_n\sqrt{\varepsilon'_n}}{c}$, где c – скорость света в вакууме.

2. Исходные сигналы РЛК-Л

ЛЧМ сигнал во временном интервале излучения от 0 до τ можно записать в виде [7]:

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi(f_{min} + \Delta F \cdot t/\tau) \cdot t)$$

где A_0 – амплитуда, τ – длительность излученного сигнала, ΔF – ширина рабочей полосы ЛЧМ сигнала, для Радара 20 она составляет $\Delta F_1 = 5$ МГц, для Радара 200 – $\Delta F_2 = 40$ МГц, f_{min} – минимальная частота рабочего диапазона. Спектр излучаемого ЛЧМ сигнала обоих радаров имеет практически прямоугольный спектр [7]. Вид спектра Радара 20 показан на рис. 1. По горизонтальной оси приведены частоты в мегагерцах, по вертикальной – значения амплитудного спектра, нормированные на величину амплитуды на

центральной частоте $f_c = (f_{min} + f_{max})/2$. Прямоугольный вид спектра искажен в окрестности минимальной и максимальной частот рабочего спектра из-за эффекта Гиббса. Спектр Радара 200 имеет аналогичный вид.

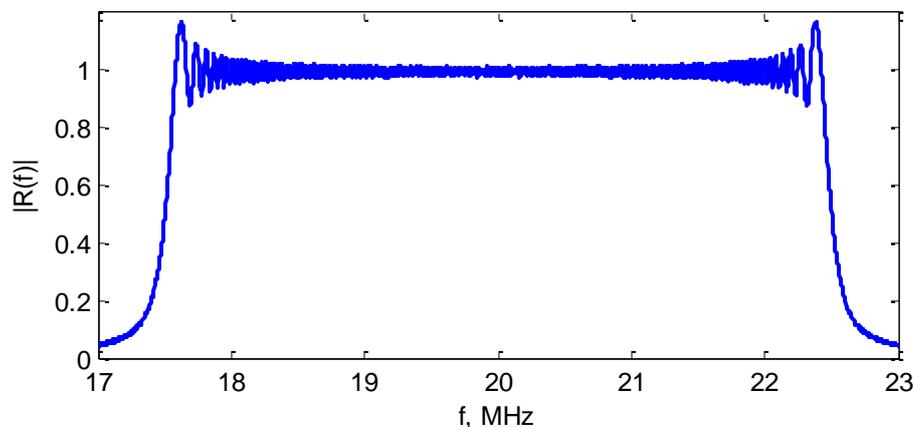


Рис. 1. Вид исходного спектра Радара 20.

3. Отраженные от поверхности Луны сигналы РЛК-Л

С физической точки зрения, отраженный от моделируемого грунта радиосигнал может быть представлен в виде суперпозиции парциальных радиосигналов, отраженных от поверхности и внутренних границ, с учетом сдвига на время их распространения до этих границ и обратно. При отражении радиоволн от границы между разными породами амплитуда сигнала уменьшается на коэффициент отражения Френеля $\Gamma_{n,n+1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_n} - \sqrt{\varepsilon_{n+1}}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}}$, при проникновении через нее на величину $(1 - \Gamma_{n,n+1})$. Поглощение и сдвиг фазы в слое грунта толщиной d_n определяется множителем $\exp\left(\frac{4\pi i f}{c} \sqrt{\varepsilon_n} d_n\right)$. Так как $\sqrt{\varepsilon_n} = \text{Re}\sqrt{\varepsilon_n} + i\text{Im}\sqrt{\varepsilon_n}$, амплитуда сигнала за счет поглощения уменьшается в $\exp\left(\frac{-4\pi f}{c} \text{Im}\sqrt{\varepsilon_n} d_n\right)$ раз. Для слабоконтрастных грунтов, в которых коэффициенты Френеля малы, а также для грунтов с сильным поглощением внутри слоев, кратными отражениями можно пренебречь.

Без ограничения общности примем начало отражения сигнала от поверхности грунта за начало отсчета времени. Через t_1 на приемник поступает сигнал, отраженный от границы раздела между реголитом и переходным слоем.

Сдвиг сигнала, отраженного от границы между переходным слоем и коренными породами, по отношению к сигналу отраженному от поверхности равен сумме времен $t_1 + t_2$. Спектр отраженного сигнала можно представить в виде: $S_0(f) = S_i(f)R_{\Sigma}(f)$, где $S_i(f)$ – спектр исходного сигнала, $R_{\Sigma}(f)$ – фильтр среды, он же коэффициент отражения. В такой интерпретации $R_{\Sigma}(f)$ может быть представлен как:

$$R_{\Sigma}(f) = r_{01} + (1 - r_{01}^2) r_{12} * \exp\left(\frac{i4\pi f}{c} d_1 \sqrt{\varepsilon_1}\right) + \\ + (1 - r_{01}^2)(1 - r_{12}^2) r_{23} * \exp\left(\frac{i4\pi f}{c} (d_1 \sqrt{\varepsilon_1} + d_2 \sqrt{\varepsilon_2})\right) \quad (1)$$

Более точно коэффициент отражения от слоистой среды $R(f)$ можно рассчитать на основе решения волнового уравнения с учетом условия непрерывности его решений и их первых производных на границах слоев. Для этого рассмотрим четыре области пространства: верхняя полуплоскость с диэлектрической проницаемостью равной 1, два слоя с $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ толщиной d_1 и d_2 и нижнее полупространство, диэлектрическая проницаемость которого равна ε_3 . Решение волнового уравнения в верхней полуплоскости имеет вид: $Y_0 = \exp(-ikz) + R(f)\exp(ikz)$, где k – волновое число, $R(f)$ – коэффициент отражения от грунта, ось z направлена из нижнего пространства в верхнее; в пределах двух слоев: $Y_n = T_n \exp(-ikz\sqrt{\varepsilon_n}) + R_n \exp(ikz\sqrt{\varepsilon_n})$. Здесь T_n – коэффициент прохождения через верхнюю границу n -го слоя, R_n – коэффициент отражения от нижней границы слоя. В нижнем полупространстве отражение снизу отсутствует, и решение уравнения записывается как $Y_3 = T(f)\exp(-ikz\sqrt{\varepsilon_3})$, где $T(f)$ – коэффициент прохождения через два вышележащих слоя. Запишем условия неразрывности решений уравнения и их первых производных на границе между вторым слоем и нижним полупространством. Обозначим координату этой границы по оси z как z_3 , тогда:

$$\begin{cases} T_2 \exp(-ikz_3\sqrt{\varepsilon_2}) + R_2 \exp(ikz_3\sqrt{\varepsilon_2}) = T(f)\exp(-ikz_3\sqrt{\varepsilon_3}) \\ \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_3}} (-T_2 \exp(-ikz_3\sqrt{\varepsilon_2}) + R_2 \exp(ikz_3\sqrt{\varepsilon_2})) = -T(f)\exp(-ikz_3\sqrt{\varepsilon_3}) \end{cases}$$

Из этой системы уравнений следует, что коэффициенты R_2 и T_2 связаны соотношением

$$R_2 = [r_{23} \exp(-2ikz_3 \sqrt{\varepsilon_2})] T_2,$$

где $r_{23} = (\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_3}) / (\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_3})$ – коэффициент отражения Френеля от границы z_3 . Далее запишем условия неразрывности решения и его первой производной на границе z_2 между первым и вторым слоями:

$$\begin{cases} T_1 \exp(-ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) + R_1 \exp(ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) = T_2 \exp(-ikz_2 \sqrt{\varepsilon_2}) + R_2 \exp(ikz_2 \sqrt{\varepsilon_2}) \\ \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} (-T_1 \exp(-ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) + R_1 \exp(ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1})) = -T_2 \exp(-ikz_2 \sqrt{\varepsilon_2}) + R_2 \exp(ikz_2 \sqrt{\varepsilon_2}) \end{cases}$$

Из первой и второй систем следует, что коэффициенты R_1 и T_1 тоже связаны линейно:

$$R_1 = T_1 \left[\exp(-2ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) \cdot \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))} \right].$$

Условия неразрывности на границе между верхним полупространством и первым слоем z_1 :

$$\begin{cases} \exp(-ikz_1) + R(f) \exp(ikz_1) = T_1 \exp(-ikz_1 \sqrt{\varepsilon_1}) + R_1 \exp(ikz_1 \sqrt{\varepsilon_1}) \\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}} (-\exp(-ikz_1) + R(f) \exp(ikz_1)) = -T_1 \exp(-ikz_1 \sqrt{\varepsilon_1}) + R_1 \exp(ikz_1 \sqrt{\varepsilon_1}) \end{cases}$$

С учетом того, что $z_1 = 0$, это система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} 1 + R(f) = T_1 + R_1 \\ \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}} (-1 + R(f)) = -T_1 + R_1 \end{cases}, \text{ следовательно:}$$

$$R(f) = \frac{\left(r_{01} + \left[\exp(-2ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) \cdot \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))} \right] \right)}{\left(1 + r_{01} \left[\exp(-2ikz_2 \sqrt{\varepsilon_1}) \cdot \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_3))} \right] \right)}$$

Заменим координаты границ по оси z на толщины слоев $z_2 = -d_1$, $z_3 = -(d_1 + d_2)$ и $k = \frac{2\pi f}{c}$:

$$R(f) = \frac{\left(r_{01} + \left[\exp(4\pi i f d_1 \sqrt{\varepsilon_1} / c) \cdot \frac{r_{12} + r_{23} \exp(4\pi i f \sqrt{\varepsilon_2} d_2 / c)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(4\pi i f \sqrt{\varepsilon_2} d_2 / c)} \right] \right)}{\left(1 + r_{01} \left[\exp(4\pi i f d_1 \sqrt{\varepsilon_1} / c) \cdot \frac{r_{12} + r_{23} \exp(4\pi i f \sqrt{\varepsilon_2} d_2 / c)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(4\pi i f \sqrt{\varepsilon_2} d_2 / c)} \right] \right)} \quad (2)$$

Следует подчеркнуть, что в этой формуле учитываются все кратные отражения между границами слоев.

Если пренебречь теми членами выражений (1) и (2), в которые входят произведения двух и более коэффициентов отражения Френеля, то формулы (1) и (2) можно свести к виду:

$$R_P(f) = r_{01} + r_{12} * \exp\left(\frac{4\pi i f}{c} d_1 \sqrt{\varepsilon_1}\right) + r_{23} * \exp\left(\frac{4\pi i f}{c} (d_1 \sqrt{\varepsilon_1} + d_2 \sqrt{\varepsilon_2})\right). (3)$$

Функцию $R_P(f)$ можно интерпретировать как коэффициент отражения сигнала, полученного в результате суперпозиции трех парциальных сигналов:

- исходного сигнала, отраженного от поверхности с коэффициентом Френеля r_{01} ;
- сдвинутого относительно первого на время t_1 исходного сигнала, отраженного от границы между слоями поверхности с коэффициентом Френеля r_{12} ;
- сдвинутого относительно первого на время $t_1 + t_2$ исходного сигнала, отраженного от границы между нижним слоем и нижним полупространством с коэффициентом Френеля r_{23} .

Так как в таком приближении не учтены потери на переход через границу между средами и вторичные отражения, расчеты, выполненные по формуле (3), не всегда будут совпадать с более точными решениями, соответствующими формулам (1) и (2).

На рис.2 приведены кривые $R_\Sigma(f)$, $R(f)$ и $R_P(f)$, рассчитанные по формулам (1), (2) и (3) соответственно, в частотном диапазоне работы радаров. По горизонтальной оси графика отмечена частота в МГц, по вертикальной – модули комплексных функций $R_\Sigma(f)$, $R(f)$ и $R_P(f)$. $R_\Sigma(f)$ отображается на графике красной штриховой кривой, $R(f)$ – зеленой пунктирной кривой, и $R_P(f)$ – голубой линией. На рис.2 (а) приведены результаты расчетов для частотного диапазона Радара 20, на рис.2(б) – для Радара 200. Расчеты выполнены для следующих параметров модели грунта: $\text{Re}\varepsilon_1 = 2$, $\text{tg}\delta_1 = 10^{-3}$, $d_1 = 20$ м, $\text{Re}\varepsilon_2 = 4$, $\text{tg}\delta_2 = 10^{-3}$, $d_2 = 100$ м, $\text{Re}\varepsilon_3 = 9$, $\text{tg}\delta_3 = 10^{-2}$.

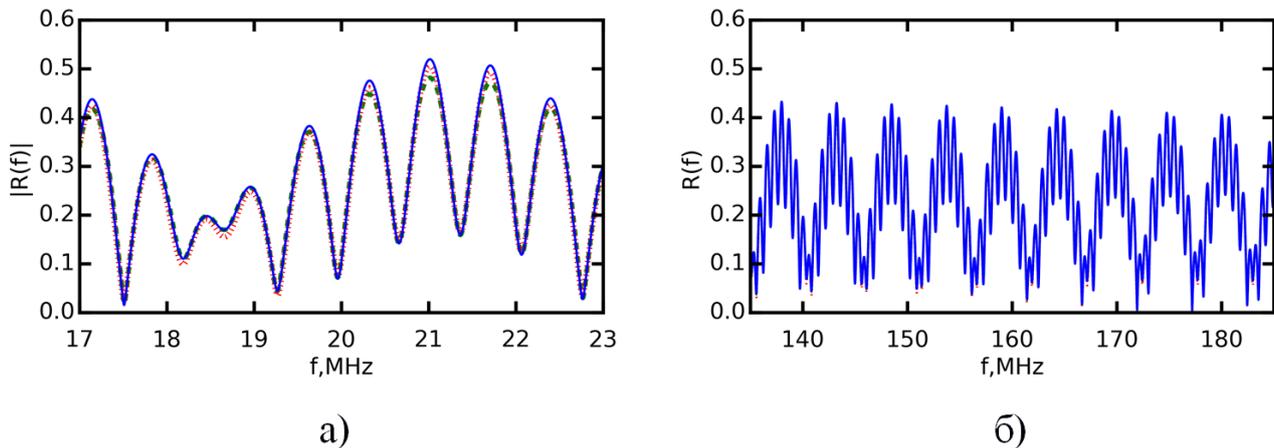


Рис. 2. Коэффициент отражения от слоистой среды
(а) – частотный диапазон Радара 20, (б) – Радара 200.

4. Анализ изменения частотной зависимости коэффициента отражения радиоволн при отражении от моделируемого грунта Луны

Анализ серии расчетов частотной зависимости коэффициента отражения радиоволн от разных моделей грунта показал, что вычисления модуля коэффициента отражения по трем формулам практически совпадают, для тех моделей, в которых нет существенного контраста между диэлектрическими свойствами пород. Однако расчеты, проведенные для модели грунта, в которой второй слой имеет диэлектрическую проницаемость равную 1, что соответствует моделированию полости в слое базальта (вулканической трубки, возникающей при извержении), приводит к тому, что коэффициент отражения, рассчитанный по формулам (1) и (3) превышает единицу, что противоречит закону сохранения энергии. В расчетах, выполненных по формуле (2), таких противоречий нет. На рис.3 (а) и рис.3(б) приведены расчеты для модели грунта с вулканической трубкой внутри; параметры модели: $\text{Re}\epsilon_1 = 9$, $\text{tg}\delta_1 = 10^{-3}$, $d_1 = 20$ м, $\text{Re}\epsilon_2 = 1$, $\text{tg}\delta_2 = 0$, $d_2 = 100$ м, $\text{Re}\epsilon_3 = 9$, $\text{tg}\delta_3 = 10^{-3}$. По горизонтальной оси графика отмечена частота в МГц, по вертикальной – абсолютная величина функций: $R_{\Sigma}(f)$ соответствует красной штриховой линии, $R(f)$ – зеленой пунктирной, и $R_p(f)$ – голубой. Моделирование отражения радиоволн от грунта с пустотами показало, что если глубина

залегания полостей кратна длине радиоволн, то значение модуля коэффициента отражения близко к единице.

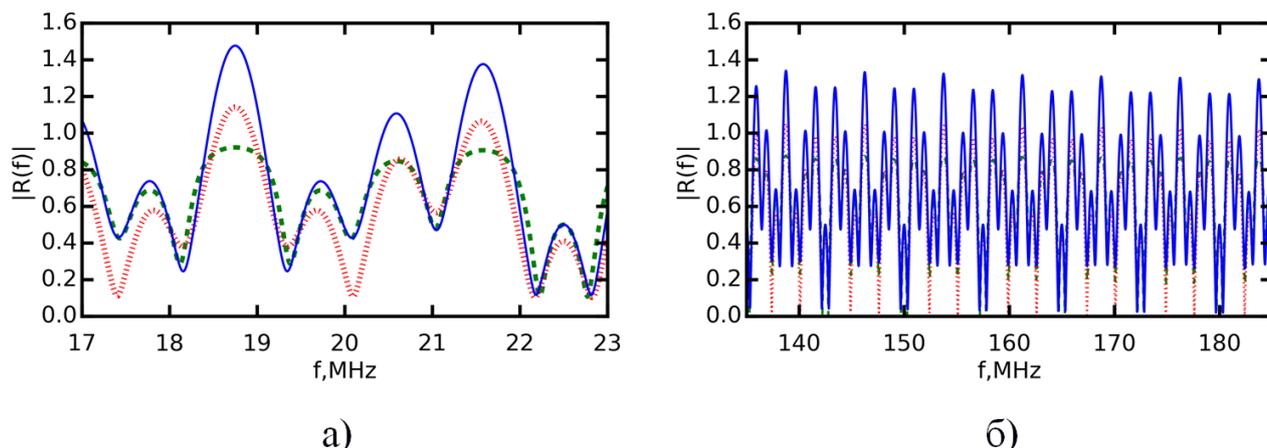


Рис. 3. Коэффициент отражения, полученный при моделировании лавовых трубок а) – частотный диапазон Радара 20, б) – Радара 200.

Из анализа проведенного моделирования, следует, что для расчетов частотной зависимости коэффициента отражения радиоволн от лунного грунта предпочтительно использовать формулу (2), так как она наиболее адекватно описывает процессы распространения радиосигнала внутри слоистой структуры грунта, включая вторичные отражения и влияние поглощающей способности.

Однако, для понимания того, как меняется форма сигналов при отражении от внутренних границ, наиболее подходит формула (3). Перепишем ее в виде: $R_p(f) = r_{01} + \exp\left(\frac{4\pi i f}{c} d_1 \sqrt{\epsilon_1}\right) W(f)$, где $W(f) = r_{12} + r_{23} * \exp\left(\frac{4\pi i f}{c} d_2 \sqrt{\epsilon_2}\right)$

На рис. 4 графически отображены отдельные компоненты формулы (4). Синей линией (кривая 1) показана функция $|W(f)|$. Она описывает частотную зависимость парциального отражения электромагнитных волн от второго слоя, лежащего на однородном полупространстве. Свойства функции $|W(f)|$ хорошо известны и подробно рассмотрены, например, в [8]. Эта функция осциллирует около значения $|r_{12}|$, которое показано на рис.4 синей пунктирной линией 2. Экстремальные значения $|W(f)|$ достигаются при частотах заданных

соотношением: $f_3 = \frac{n\pi - \gamma + \xi}{\beta}$, где $\gamma = \arccos \left[\frac{\text{Re}(r_{23})}{|r_{23}|} \right]$, $\xi = \arccos \left[\frac{\text{Re}(r_{12})}{|r_{12}|} \right]$, $\beta = 4\pi d_2 \text{Re} \sqrt{\varepsilon_2} / c$, $n = 1, 2, \dots$. Если в грунте нет потерь, то функция периодическая и ее период равен $T = \pi / \beta$. Если потери есть – функция псевдопериодическая, кроме того, при росте $f \rightarrow \infty$ выполняется условие $|W| \rightarrow |r_{12}|$ и скорость схождения верхней и нижней огибающих осциллирующей $|W(f)|$ зависит от величины поглощения. Кривая 3 на рис. 4 (зеленая пунктирная линия) отображает функцию $V(f) = r_{01} + \exp \left(\frac{4\pi i f}{c} d_1 \sqrt{\varepsilon_1} \right) r_{12}$, которая получена при условии, что $W(f) = r_{12}$. Кривая 4 (сплошная зеленая линия) соответствует частотной зависимости коэффициента отражения, рассчитанной по формуле (2). Заметим, что чем глубже граница грунта, дающая парциальный коэффициент отражения, тем чаще осцилляции и, соответственно, меньше период повторения экстремальных точек графика. Поэтому, для наглядности, рис. 4б) построен не для всего частотного диапазона Радара 200, а для частот от 135 до 145 МГц, в противном случае отдельные осцилляции будут сливаться, что затруднит визуальное восприятие рисунка.

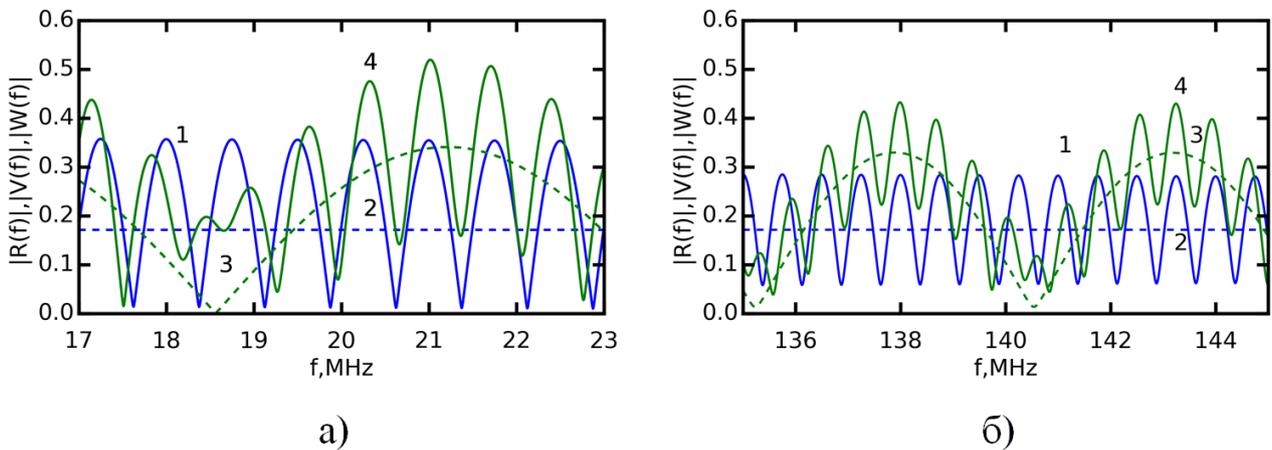


Рис. 4. Стадии формирования коэффициента отражения радиоволн
 а) – частотный диапазон Радара 20,
 б) – часть рабочего частотного диапазона Радара 200.

Как было показано выше, спектр отраженного сигнала может быть получен в результате умножения спектра исходного сигнала на функцию зависимости коэффициента отражения от частоты $R(f)$. На рис. 5 представлены результаты расчета спектра отраженного сигнала, полученного при

моделировании отражения от грунта с лавовыми трубками внутри. Параметры грунта такие же, как для рис. 3а. На рис. 5 красной линией отображен спектр исходного сигнала Радара 20, зеленой линией – функция зависимости коэффициента отражения от частоты $R(f)$, рассчитанная по формуле (2), синей линией – спектр отраженного сигнала. Аналогичные расчеты могут быть выполнены для получения спектра сигнала Радара 200, а также для любых других параметров грунта в рамках используемой модели плоскостростой среды и для любых спектров излучаемого сигнала.

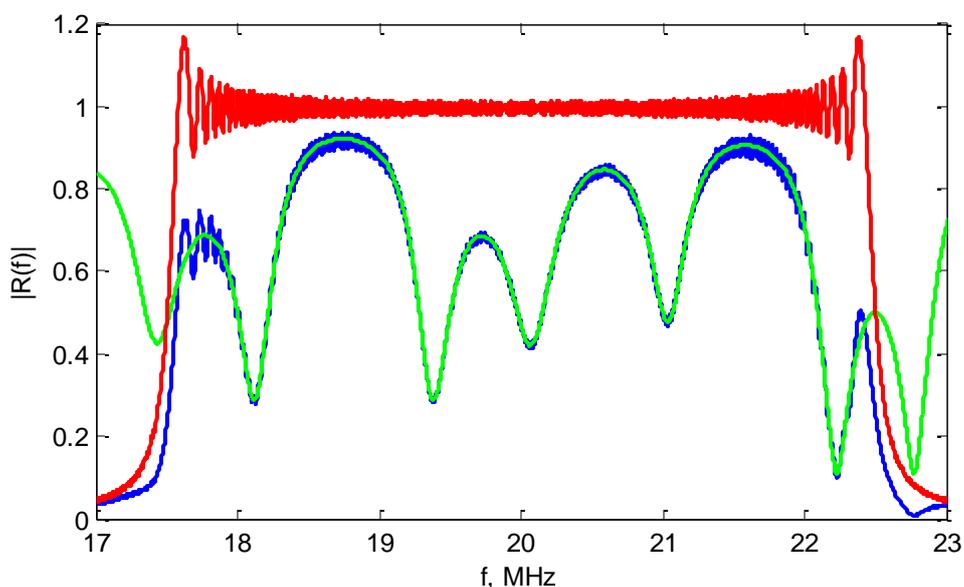


Рис. 5. Вид спектра исходного и отраженного сигнала Радара 20, полученного при моделировании отражения от лавовых трубок.

Заключение

В результате моделирования отражения радиосигналов радаров комплекса РЛК-Л от двухслойного грунта Луны сделаны следующие выводы:

1) Для расчета частотной зависимости коэффициента отражения сигналов от грунта Луны предпочтительно пользоваться формулой (2).

2) При наличии пустот в грунте отражение будет более интенсивным, чем от грунта в районах, где внутренних пустот нет. В том случае если глубина залегания полости или ее вертикальные размеры будут кратны длине волны, то на этой частоте абсолютная величина коэффициента отражения может быть практически равной 1.

3) При отражении радиосигнала от диэлектрически однородного грунта, форма спектра отраженного сигнала будет совпадать со спектром исходного сигнала.

4) При отражении радиосигнала от грунта, в котором есть внутренние границы между породами с отличающимися диэлектрическими характеристиками, амплитудный спектр будет иметь осциллирующий вид; причем чем толще внутренний слой, тем чаще осцилляции; если в грунте несколько границ – в частотной зависимости коэффициента отражения можно будет выделить несколько составляющих осцилляций с различными периодами, соответствующими диэлектрическим толщинам слоев.

5) При наличии поглощения в грунте прямоугольный спектр ЛЧМ сигнала разрушается на высоких частотах, что приводит к уменьшению ширины спектра и, соответственно, к ухудшению разрешающей способности прибора.

Работа выполнена в интересах научной поддержки радиофизических экспериментов проекта «Луна-Ресурс» в части прогнозирования результатов экспериментов и выработки методов восстановления глубинного распределения диэлектрических характеристик и плотности лунного грунта по полученным измерениям.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Луна - шаг к технологиям освоения Солнечной системы. / Под научной ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. М.: РКК Энергия, 2011.
2. Смирнов В.М., Юшкова О.В., Марчук В.Н. и др. Проект Луна-Глоб: радиолокационное зондирование грунта Луны // Радиотехника и электроника. – 1913. – Т.58. – №.9. – С. 926-926.
<https://doi.org/10.7868/S0033849413090131>

3. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon / Cambridge University Press, 1991. 736 p.
https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/LunarSourceBook.pdf
4. Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon// Earth and Planetary Science Letters. 1975. vol. 24. pp. 394 – 404
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90146-6)
5. Phillips R.J., Zuber M.T., Smrekar S.E. et al. Mars north polar deposits: Stratigraphy, age, and geodynamical response // SCIENCE - 2008. - V. 320 - I.5880 - P. 1182-1185. <https://doi.org/10.1126/science.1157546>
6. Kaku T., Haruyama J., Miyake W. et al. Detection of intact lava tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) lunar radar sounder // Geophysical Research Letters. - 2017. - V. 44. - N 10 - P. 155–161.
<https://doi.org/10.1002/2017GL074998>
7. Сколник М. Справочник по радиолокации. Том 1 М.: Сов. Радио, 1976. 456 с.
8. Юшкова О.В. О восстановлении параметров отражающего полупространства // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 40. N 1. С. 40-44

Для цитирования:

Юшкова О.В., Марчук В.Н. Расчет спектра отраженного сигнала при подповерхностном зондировании лунного грунта // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 1.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.11>